Estudo de Robustez em Sistemas Lineares por Meio de Relaxações em Termos de Desigualdades Matriciais Lineares

Defesa de Tese

Candidato: Ricardo C. L. F. Oliveira

Orientador: Pedro L. D. Peres

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - BRASIL

Campinas, 24 de Março de 2006

Descrição da Apresentação

Descrição da Apresentação

Estabilidade de Sistemas Dinâmicos

Considere o sistema linear

$$\dot{x} = Ax, \; x \in \mathbb{R}^n \tag{1}$$

Teorema 1 (Lyapunov)

Estabilidade (Lyapunov): O sistema linear dado por (1) é estável (trajetórias iniciando em qualquer ponto convergem para $x = 0$) se e somente se existir $P = P' \in \mathbb{R}^{n \times n}$ tal que

$$A'P + PA < 0; \; P > 0$$

Definindo-se um critério linear para os elementos da matriz P, as desigualdades $A'P + PA < 0; \; P > 0$ podem ser colocadas na forma do seguinte problema otimização.

Programação Semidefinida

$$\min_{x \in \mathbb{R}^r} c'x$$
$$\text{tal que} \quad F(x) \triangleq F_0 + x_1 F_1 + x_2 F_2 + \cdots + x_r F_r > 0 \qquad (2)$$

sendo que $c \in \mathbb{R}^r$, $F_i = F_i' \in \mathbb{R}^{q \times q},\ i = 1, \ldots, r$ e $x \in \mathbb{R}^r$ são as variáveis de decisão do problema.

- Desigualdade matricial linear - LMI
- Existem programas computacionais especializados (algoritmos convergem em tempo polinomial) na resolução de LMIs: LMI Control Toolbox (MatLab), SeDuMi, etc.
- Inúmeros problemas de controle podem ser formulados como LMIs.

Sistemas Lineares Incertos

Sistema linear incerto com representação politópica:

$$\dot{x} = A(\alpha)x, \qquad A(\alpha) \in \mathcal{A} \tag{3}$$

$$\mathcal{A} \triangleq \left\{ A(\alpha) : A(\alpha) = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i A_i, \ \ \alpha \in \Delta_N \right\}$$

$$\Delta_N = \left\{ \alpha \in \mathbb{R}^N : \sum_{i=1}^{N} \alpha_i = 1, \ \alpha_i \geq 0, \ i = 1, \ldots, N \right\}$$

Δ_N - *simplex unitário*.

Estabilidade Robusta

Questão

Como decidir sobre a estabilidade robusta de $A(\alpha)\ \forall\alpha \in \Delta_N$ por meio de um número finito de testes (LMIs) ?

Teorema 2 (Lyapunov)

O sistema linear dado por (3) é estável se e somente se existir $P(\alpha) = P(\alpha)' \in \mathbb{R}^{n\times n}$ *tal que*

$$A(\alpha)'P(\alpha) + P(\alpha)A(\alpha) < 0;\ P(\alpha) > 0,\ \forall\alpha \in \Delta_N \qquad (4)$$

LMIs dependentes de parâmetros

Comentários

- $P(\alpha)$ não possui uma estrutura particular.
- Infinitos números de testes.
- LMIs dependentes de parâmetros.
- Saída: Arbitrar uma estrutura para $P(\alpha)$, ao preço de um possível conservadorismo na solução.

Resultados da Literatura

Resultados Anteriores

- Estabilidade quadrática ($P(\alpha) = P$) $\rightarrow$ simples mas conservadora.
- Funções de Lyapunov com dependência afim nos parâmetros ($P(\alpha) = \sum \alpha_i P_i$) $\rightarrow$ [FAG96], [GdOH98], [RP01] (ainda) conservadoras.
- Funções de Lyapunov com dependência polinomial nos parâmetros $\rightarrow$ resultados não conservadores.

Objetivo

O objetivo desta tese é apresentar uma metodologia sistemática para encontrar soluções de LMIs dependentes de parâmetros que pertencem ao simplex unitário.

Descrição da Apresentação

Funções de Lyapunov lineares

Considere a a função de Lyapunov $v(x) = x'P(\alpha)x$ com

$$P(\alpha) = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i P_i, \qquad \alpha \in \Delta_N$$

Aplicando as definições de $A(\alpha)$ e $P(\alpha)$, tem-se

$$A(\alpha)'P(\alpha) + P(\alpha)A(\alpha) = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i^2 (\underbrace{A_i'P_i + P_iA_i}_{T_i}) +$$

$$\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^{N} \alpha_i\alpha_j (\underbrace{A_i'P_j + P_jA_i + A_j'P_i + P_iA_j}_{T_{ij}}) \quad (5)$$

Condição suficiente: $P_i > 0$, $T_i < 0$ e $T_{ij} < 0$.

Suficiência $\rightarrow$ Necessidade ?

Questão

A partir de (5), é possível obter condições que também sejam necessárias?

Teorema 3 (Pólya)

Seja $F(\alpha) \triangleq F(\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_N)$ *um polinômio homogêneo real que é positivo* $\forall \alpha \in \Delta_N$*. Então para um* $d \in \mathbb{Z}_+$ *suficientemente grande, o produto*

$$(\alpha_1 + \alpha_2 + \ldots + \alpha_N)^d F(\alpha)$$

tem todos os seus coeficientes estritamente positivos.

Resultado

Teorema 4 (Oliveira & Peres, LAA (2005))

Uma matriz de Lyapunov com dependência afim nos parâmetros garante a estabilidade robusta de $\mathcal{A}$ se e somente se existirem matrizes simétricas definidas positivas $P_i, \; i = 1, \ldots, N$ e um d suficientemente grande tais que os coeficientes do polinômio homogêneo

$$(\alpha_1 + \ldots + \alpha_N)^d \big(A(\alpha)' P(\alpha) + P(\alpha) A(\alpha)\big)$$

sejam todos definidos negativos.

Estudo de caso $N = 2$

Considere as condições do Teorema 4 aplicadas a um politopo $\mathcal{A}$ de $N = 2$ vértices:

$$T_{H_1} = A_1' P_1 + P_1 A_1; \qquad T_{H_2} = A_2' P_2 + P_2 A_2$$

$$T_{H_{12}} = A_1' P_2 + P_2 A_1 + A_2' P_1 + P_1 A_2$$

$\rightsquigarrow$ Para $d = 0$, as LMIs

$$T_{H_1} < 0; \qquad T_{H_2} < 0 \tag{6}$$

que são condições necessárias e

$$T_{H_{12}} < 0 \tag{7}$$

$\rightsquigarrow$ Para $d = 1$, as LMIs são (6) e

$$T_{H_1} + T_{H_{12}} < 0; \qquad T_{H_2} + T_{H_{12}} < 0 \tag{8}$$

Funções de Lyapunov Polinomiais

De acordo com [Bli04], LMIs dependentes de parâmetros escalares podem necessitar de soluções polinomiais nos parâmetros.

Proposta

Usar funções de Lyapunov polinomiais homogêneas nos parâmetros

$$P_g(\alpha) = \sum_{j=1}^{J(g)} \alpha_1^{k_1} \alpha_2^{k_2} \cdots \alpha_N^{k_N} P_{\mathcal{K}_j(g)}\ ; \quad k_1 k_2 \cdots k_N = \mathcal{K}_j(g) \qquad (9)$$

Resultado

Teorema 5 (Oliveira & Peres, SCL (2006))

Se existir uma matriz de Lyapunov polinomial homogênea de grau arbitrário nos parâmetros $P_g(\alpha) > 0$ tal que

$$A(\alpha)'P_g(\alpha) + P_g(\alpha)A(\alpha) < 0 \tag{10}$$

então o politopo $\mathcal{A}$ é estável.

A parametrização para (10) pode ser encontrada na tese.

Os resultados mostram que o conservadorismo das condições diminui à medida que o grau da função de Lyapunov aumenta.

Estudo de Caso

Estudo de caso $N = 2$, $g = 1$ versus $g = 2$.

$$P(\alpha) = \alpha_1 P_1 + \alpha_2 P_2$$

$$\begin{aligned} A_1' P_1 + P_1 A_1 &< 0 \\ A_2' P_2 + P_2 A_2 &< 0 \\ A_1' P_2 + P_2 A_1 + A_2' P_1 + P_1 A_2 &< 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P(\alpha) = \alpha_1^2 P_{20} &+ \alpha_1 \alpha_2 P_{11} \\ &+ \alpha_2^2 P_{02} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_1 P_{20} + P_{20} A_1 &< 0 \\ A_2 P_{02} + P_{02} A_2 &< 0 \\ A_1 P_{02} + A_2 P_{11} + P_{02} A_1 + P_{11} A_2 &< 0 \\ A_1 P_{11} + A_2 P_{20} + P_{11} A_1 + P_{20} A_2 &< 0 \end{aligned}$$

Funções Polinomiais & Pólya

Teorema 6

Uma função de Lyapunov polinomial homogênea de grau arbitrário nos parâmetros $P_g(\alpha)$ garante a estabilidade de $\mathcal{A}$ se e somente se existir um d suficientemente grande tal que

$$(\alpha_1 + \ldots + \alpha_N)^d P_g(\alpha) > 0;$$
$$(\alpha_1 + \ldots + \alpha_N)^d (A(\alpha)' P_g(\alpha) + P_g(\alpha) A(\alpha)) < 0;$$

g e d.

Não há perda de generalidade quando se consideram funções de Lyapunov polinomiais homogêneas ao invés de funções polinomiais gerais.

Fato interessante: Com o resultado do Teorema 6 é possível provar a convergência assintótica do Teorema 5.

Aplicações Imediatas

A flexibilidade da metodologia permite tratar outras LMIs dependentes de parâmetros.

Teorema 7 (Condição de estabilidade estendida)

Uma função de Lyapunov polinomial homogênea de grau arbitrário nos parâmetros $P_g(\alpha)$ garante a estabilidade de $\mathcal{A}$ se e somente se existir um d suficientemente grande e uma matriz polinomial homogênea $X_g(\alpha)$ tais que

$$(\alpha_1 + \ldots + \alpha_N)^d P_g(\alpha) > 0;$$
$$(\alpha_1 + \ldots + \alpha_N)^d \big(Q_g(\alpha) + X_g(\alpha)\mathcal{B}(\alpha) + \mathcal{B}(\alpha)' X_g(\alpha)'\big) < 0$$

com

$$\left[\begin{array}{cc} 0 & P_g(\alpha) \\ P_g(\alpha) & 0 \end{array}\right], \quad \mathcal{B}(\alpha) = [A(\alpha) \;\; -I]$$

Outras LMIs Dependentes de Parâmetros

Custos garantidos $\mathcal{H}_\infty$

$$\begin{bmatrix} A(\alpha)'P_g(\alpha) + P_g(\alpha)A(\alpha) & P_g(\alpha)B(\alpha) & C(\alpha)' \\ \star & -\mathrm{I} & D(\alpha)' \\ \star & \star & -\mu\mathrm{I} \end{bmatrix} < 0$$

Custos garantidos $\mathcal{H}_2$

$$T > C(\alpha)P_g(\alpha)C(\alpha)'$$
$$A(\alpha)P_g(\alpha) + P_g(\alpha)A(\alpha)' + B(\alpha)B(\alpha)' < 0$$

Outras Aplicações

Outras Aplicações

Em geral, a metodologia proposta pode ser aplicada em qualquer LMI dependente de parâmetros pertencentes ao simplex unitário. Ex.: Sistemas politópicos com atraso, sistemas neutrais, positividade real, síntese de controladores dependentes de parâmetros, etc.

Descrição da Apresentação

Métodos Polinomiais

Para o caso de estabilidade robusta, as condições propostas na tese são comparadas com outros métodos da literatura que também são suficientes e assintoticamente necessários.

Chesi et al. (CGTV05)

Garante a estabilidade robusta por meio da existência de uma função de Lyapunov polinomial homogênea. Transforma o problema na analise da positividade de uma matriz de Gram (representação completa de matriz quadrada), obtendo relaxações LMIs convergentes.

Métodos Polinomiais

P.-A. Bliman (Bli04)

Garante a estabilidade robusta de um sistema linear com incertezas na forma afim por meio da existência de uma matriz de Lyapunov polinomial geral. Usa o Lema de KYP para obter condições LMIs assintoticamente necessárias. Pode ser adaptado para o caso politópico, resultando na análise de N sistemas afins com $N-1$ parâmetros incertos cada.

Métodos Polinomiais

Henrion et al. (HAPL04)

Por meio do critério de estabilidade de Hermite, o problema de estabilidade robusta pode ser escrito na forma de um problema de otimização envolvendo função objetivo e restrições polinomiais. O software de otimização global de polinômios “Gloptipoly” é usado para determinar se o polinômio é positivo, e conseqüentemente, garantir a estabilidade robusta. O problema de otimização é resolvido por meio de uma seqüencia de condições LMIs assintoticamente convergentes (teoria de momentos, Lasserre 2001).

Exemplo 1

Exemplo 1: Este exemplo ilustra como o processo de relaxação evolui à medida que d aumenta (Teorema 4). Considere um sistema incerto a tempo contínuo com $n = 3$ e $N = 2$, dado por

$$A_1 = \begin{bmatrix} -0.1938 & 0.3961 & -0.7104 \\ 0.0374 & 0.0988 & -0.9082 \\ 0.4803 & -0.2257 & -0.4496 \end{bmatrix};$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} -0.6343 & 0.1343 & -0.9079 \\ -0.7179 & -0.6443 & -0.2978 \\ 0.3733 & -0.4191 & 0.3495 \end{bmatrix}$$

Com $P(\alpha)$ afim, o Teorema 4 fornece uma seqüência de relaxações para $d = \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$ mostrada na Tabela 1.

Tabela de convergência

Tabela 1: Evolução do máximo autovalor das LMIs $\ell = 1, \ldots, J(d+2)$, para $d = \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$ na análise de estabilidade do Exemplo 1.

	$\lambda_{max}(T_\ell)$					
ℓ	$d = 0$	$d = 1$	$d = 2$	$d = 3$	$d = 4$	$d = 5$
1	-0.039	-0.039	-0.039	-0.039	-0.039	-0.039
2	1908.58	1024.06	273.88	92.67	27.81	-0.03
3	-0.004	823.43	511.81	258.75	53.84	-21.06
4		-0.004	198.02	222.42	62.54	-64.22
5			-0.004	63.65	41.83	-57.69
6				-0.004	18.48	-15.95
7					-0.004	-0.19
8						-0.004

Evolução de λ_{max}

A figura abaixo ilustra graficamente a evolução do máximo autovalor de cada LMI.

rag replacements

$\max \lambda_{max}(T_\ell)$

d

Exemplo 2

Exemplo 2: Sistema contínuo ($n = 2$, $N = 4$) com vértices dados por

$$A_1 = \begin{bmatrix} -0.468 & 0.845 \\ 0.272 & -0.423 \end{bmatrix};\; A_2 = \begin{bmatrix} 0.825 & 0.427 \\ 0.299 & -0.346 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} -0.744 & 0.214 \\ 1.242 & 0.545 \end{bmatrix}; \quad A_4 = \begin{bmatrix} 0.330 & -1.140 \\ -0.322 & 0.309 \end{bmatrix}$$

O objetivo é comparar as abordagens propostas na tese (T6 e T7) com os métodos polinomiais de [CGTV05] e [HAPL04]. T7 é a extensão de T6 por meio do Teorema de Finsler. A Tabela 2 apresenta as comparações.

Comparações

Tabela 2: Comparação dos resultados dos Teoremas 6 e 7 com os métodos [CGTV05] e [HAPL04] em termos do esforço computacional. K é o número de variáveis escalares e L é o número de linhas de LMIs.

Método	K	L	Tempo MatLab	Tempo SeDuMi
$[\mathrm{HAPL04}]_{k=4}$	494	385	–	$9.76\ s$
$[\mathrm{CGTV05}]_{m=1}$	586	48	$> 60\ s$	$4.11\ s$
$\mathrm{T6}_{g=1,d=3}$	12	232	$2.73\ s$	$0.25\ s$
$\mathrm{T6}_{g=2,d=2}$	30	294	$5.20\ s$	$0.32\ s$
$\mathrm{T6}_{g=3,d=0}$	60	180	$0.31\ s$	$0.21\ s$
$\mathrm{T7}_{g=1,d=0}$	44	48	$0.09\ s$	$0.10\ s$

Exemplo 3

Exemplo 3: Sistema contínuo de dimensão ($n = 3$, $N = 4$) com vértices dados por

$$A_1 = \begin{bmatrix} -0.78 & -0.53 & 0.35 \\ -0.46 & -0.39 & 0.67 \\ -0.97 & -0.91 & 0.05 \end{bmatrix} A_2 = \begin{bmatrix} -1.09 & -0.34 & 0.49 \\ 0.49 & -0.77 & 0.22 \\ -0.11 & 0.64 & -0.49 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} -0.41 & 0.89 & -0.85 \\ -0.19 & -0.41 & 0.59 \\ 0.57 & 0.11 & -0.97 \end{bmatrix} A_4 = \begin{bmatrix} -0.64 & -0.87 & -0.99 \\ -0.73 & -0.99 & -0.12 \\ 0.70 & 0.28 & 0.01 \end{bmatrix}$$

Comparações

Tabela 3: Comparação numérica para o Exemplo 3.

Método	K	L	Tempo MatLab	Tempo SeDumi
[CGTV05]$_{m=2}$	414	48	> 600 s	78.9 s
[HAPL04]$_{k=4}$	494	385	–	19.07 s
T6$_{g=2,d=3}$	60	420	5.82 s	0.99 s
T6$_{g=3,d=1}$	120	273	2.01 s	0.50 s
T6$_{g=4,d=0}$	210	273	1.35 s	0.65 s
T7$_{g=2,d=0}$	240	150	3.99 s	0.61 s

Exemplo 4: Normas $\mathcal{H}_2$ e $\mathcal{H}_\infty$

Considere uma sistema discreto SISO com $n = 2$ estados e $N = 2$ vértices dados por

$$A_1 = \begin{bmatrix} -0.05 & 0.97 \\ -1.00 & 0.01 \end{bmatrix}; \quad A_2 = \begin{bmatrix} -1.68 & -1.44 \\ 0.94 & 0.22 \end{bmatrix}$$

$$B_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}'; \; C_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}; \; D_i = 0; \; i = 1, 2$$

Os métodos da literatura baseados em funções de Lyapunov com dependência afim nos parâmetros não são capazes de detectar a estabilidade robusta do sistema. Os resultados fornecidos pelas condições propostas são apresentados na Tabela 4

Exemplo 4

Tabela 4: Custos garantidos para o sistema incerto a tempo discreto do Exemplo 1, computados usando-se os métodos propostos na tese para (A_i, B_i, C_i) (primal - P) e (A_i', C_i', B_i') (dual - D). A norma $\mathcal{H}_\infty$ de pior caso é $\|H\|_{\infty p.c.} = 86.77$ e a norma $\mathcal{H}_2$ de pior caso é $\|H\|_{2p.c.} = 7.79$. O símbolo '–' significa que nenhuma solução factível foi encontrada.

$\mathcal{H}_\infty$			$\mathcal{H}_2$		
Método	(P)	(D)	Método	(P)	(D)
$T4.2_{g<7}$	–	–	$(T4.4,T4.6)_{g<7}$	–	–
$T4.2_{g=7}$	134.36	302.35	$(T4.4,T4.6)_{g=7}$	24.78	73.40
$T4.2_{g=8}$	86.79	103.59	$(T4.4,T4.6)_{g=8}$	8.96	29.33
$T4.2_{g=9}$	86.77	86.77	$(T4.4,T4.6)_{g=9}$	7.79	17.15
$T4.3_{g=1}$	–	–	$(T4.5,T4.8)_{g=1}$	–	–
$T4.3_{g=2}$	86.77	86.77	$(T4.5,T4.8)_{g=2}$	7.79	7.79

Exemplo 5: Norma $\mathcal{H}_\infty$

Considere o sistema politópico a tempo contínuo apresentado em [CGTV05c](Exemplo 2). As dimensões do sistemas são $n = 4$, $N = 3$ e os vértices são dados por

$$A_1 = \begin{bmatrix} -0.42 & -1.68 & -2.24 & 2.92 \\ -0.74 & -1.74 & -4.58 & 1.44 \\ -2.92 & 3.84 & -6.98 & 2.00 \\ -4.92 & -2.68 & -8.66 & -0.78 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} -0.78 & 5.52 & 1.36 & 5.80 \\ -5.42 & -4.62 & -0.26 & -1.08 \\ 2.48 & 6.00 & -7.70 & -7.72 \\ -1.32 & 3.80 & 2.14 & 2.10 \end{bmatrix}$$

Exemplo 5: Norma $\mathcal{H}_\infty$

$$A_3 = \begin{bmatrix} -4.20 & -3.12 & -2.96 & 1.84 \\ 4.48 & -1.02 & -2.78 & -7.38 \\ 1.22 & -0.12 & -2.66 & -0.34 \\ 2.10 & 4.52 & -1.28 & -1.50 \end{bmatrix}$$

$$B_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}'; \; C_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \; D_i = 0; \; i = 1, 3$$

Os resultados são apresentados na Tabela 5.

Exemplo 5: Norma $\mathcal{H}_\infty$

Tabela 5: Comparação dos condições propostas com o método de [CGTV05c]. A norma $\mathcal{H}_\infty$ de pior caso é $\|H\|_{\infty p.c.} = 1.215$.

Método	K	L	γ^*	Tempo (Sedumi)
[CGTV05c]$_{m=2}$	1066	74	1.215	–
T5.5$_{g=2,d=0}$	361	124	1.405	2.28 s
T5.5$_{g=2,d=1}$	361	190	1.271	3.30 s
T5.5$_{g=2,d=2}$	361	270	1.246	4.72 s
T5.5$_{g=2,d=3}$	361	364	1.231	7.04 s
T5.5$_{g=2,d=4}$	361	472	1.221	9.96 s
T5.5$_{g=2,d=5}$	361	594	1.215	11.38 s
T5.5$_{g=3,d=0}$	601	190	1.215	9.79 s

Descrição da Apresentação

Concluindo

1. Relaxações LMI assintoticamente exatas foram apresentadas para encontrar soluções de LMIs dependentes de parâmetros ligadas à análise robusta de sistemas lineares com incertezas politópicas.
2. As relaxações exploram funções de Lyapunov com dependência polinomial homogênea nos parâmetros.
3. O Teorema de Pólya é usado para garantir a convergência das condições propostas.
4. Os métodos propostos apresentam bons resultados quando comparados com os outros métodos da literatura.
5. Outros problemas de análise e controle escalonado podem ser abordados de maneira similar.

Concluindo

1. Relaxações LMI assintoticamente exatas foram apresentadas para encontrar soluções de LMIs dependentes de parâmetros ligadas à análise robusta de sistemas lineares com incertezas politópicas.
2. As relaxações exploram funções de Lyapunov com dependência polinomial homogênea nos parâmetros.
3. O Teorema de Pólya é usado para garantir a convergência das condições propostas.
4. Os métodos propostos apresentam bons resultados quando comparados com os outros métodos da literatura.
5. Outros problemas de análise e controle escalonado podem ser abordados de maneira similar.

Concluindo

1. Relaxações LMI assintoticamente exatas foram apresentadas para encontrar soluções de LMIs dependentes de parâmetros ligadas à análise robusta de sistemas lineares com incertezas politópicas.
2. As relaxações exploram funções de Lyapunov com dependência polinomial homogênea nos parâmetros.
3. O Teorema de Pólya é usado para garantir a convergência das condições propostas.
4. Os métodos propostos apresentam bons resultados quando comparados com os outros métodos da literatura.
5. Outros problemas de análise e controle escalonado podem ser abordados de maneira similar.

Concluindo

1. Relaxações LMI assintoticamente exatas foram apresentadas para encontrar soluções de LMIs dependentes de parâmetros ligadas à análise robusta de sistemas lineares com incertezas politópicas.
2. As relaxações exploram funções de Lyapunov com dependência polinomial homogênea nos parâmetros.
3. O Teorema de Pólya é usado para garantir a convergência das condições propostas.
4. Os métodos propostos apresentam bons resultados quando comparados com os outros métodos da literatura.
5. Outros problemas de análise e controle escalonado podem ser abordados de maneira similar.

Concluindo

1. Relaxações LMI assintoticamente exatas foram apresentadas para encontrar soluções de LMIs dependentes de parâmetros ligadas à análise robusta de sistemas lineares com incertezas politópicas.
2. As relaxações exploram funções de Lyapunov com dependência polinomial homogênea nos parâmetros.
3. O Teorema de Pólya é usado para garantir a convergência das condições propostas.
4. Os métodos propostos apresentam bons resultados quando comparados com os outros métodos da literatura.
5. Outros problemas de análise e controle escalonado podem ser abordados de maneira similar.

Perspectivas

Perspectivas

1. Estrutura dos multiplicadores nas condições estendidas (Finsler).
2. Sistemas com parâmetros variantes no tempo.
3. Obtenção de novas LMIs dependentes de parâmetros que apresentem propriedades numéricas favoráveis (Finsler).

Perspectivas

Perspectivas

1. Estrutura dos multiplicadores nas condições estendidas (Finsler).
2. Sistemas com parâmetros variantes no tempo.
3. Obtenção de novas LMIs dependentes de parâmetros que apresentem propriedades numéricas favoráveis (Finsler).

Perspectivas

Perspectivas

1. Estrutura dos multiplicadores nas condições estendidas (Finsler).
2. Sistemas com parâmetros variantes no tempo.
3. Obtenção de novas LMIs dependentes de parâmetros que apresentem propriedades numéricas favoráveis (Finsler).

Agradecimentos

Agradecimentos

1. Prof. Pedro Peres
2. Colegas do Departamento
3. FAPESP